



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

REGENERATIVNÍ TLUMIČ ODPRUŽENÍ

REGENERATIVE SHOCK ABSORBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Jirků

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Filip Jirků**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Regenerativní tlumič odpružení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S ohledem na snižování spotřeby vozidel (jak s elektrickým, tak spalovacím motorem) je snahou využít také energii posuvného pohybu teleskopického tlumiče. Existují koncepty různých principů, jak tuto energii zužítkovat v běžných osobních vozidlech tyto systémy však dosud nasazovány nejsou.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši konstrukcí regenerativních systémů odpružení.

Na zjednodušeném modelu odpružení provést výpočet pro odhad výkonu, který je možné ze systému odpružení konstrukcí regenerativního tlumiče získat (pro různé povrchy vozovky).

Provést koncepční návrh jednoduchého regenerativního tlumiče, zhodnotit ekonomiku jeho provozu.

Seznam doporučené literatury:

DIXON, John. The Shock Absorber Handbook. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 432 s. ISBN 978-0-470-51020-9.

REIMPELL, Jornsens. The Automotive Chassis. 2nd edition. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2001. 444 s. ISBN 0-7506-5054-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Při jízdě automobilem dochází k neustálému kmitání odpružení vlivem nerovnosti vozovky. Tlumiče pohlcují nerovnostmi dodanou energii do odpružení, aby byl zvýšen jízdní komfort a ovladatelnost vozidla. Práce se na konkrétním koncepčním návrhu zabývá otázkou, jakým způsobem je možné energii z tlumičů získat a zda může být přínosem pro elektromobily.

KLÍČOVÁ SLOVA

regenerativní systém odpružení, hydraulický tlumič, profil vozovky, čtvrtinový model automobilu

ABSTRACT

When car is driven on bumpy road, then suspension is continuously vibrating. Energy of vibration is absorbed by shock absorber, which improves comfort and car handling. Thesis is investigating possibility of using vibration energy to gain electricity on designed concept.

KEYWORDS

regenerative suspension system, hydraulic shock-absorber, road profile, quarter car model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIRKŮ, Filip. *Regenerativní tlumič odpružení* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116930>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ondřej Blatňák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2019

.....

Filip Jirků

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Ondřeji Blaťákovi Ph.D. za cenné rady a věcné připomínky při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	9
1 Odpružení osobních automobilů.....	10
1.1 Hydraulické odpružení.....	10
1.2 Listové odpružení	12
1.3 Pneumatické odpružení.....	13
2 Představení konceptů	16
2.1 Regenerativní tlumiče využívající lineární pohyb	16
2.2 Regenerativní tlumiče využívající rotační pohyb	18
3 Výpočet průběhu stlačování tlumičů	22
3.1 Profil povrchu vozovky	22
3.2 Čtvrtinový model automobilu	25
4 Koncepční návrh a jeho možný zisk energie	31
4.1 Koncepční návrh	31
4.2 Možný zisk energie	34
Závěr	36
Seznam použitých zkratk a symbolů	40

ÚVOD

V oborech napříč celým strojírenským průmyslem se čím dál více setkávám se snahou o využití obnovitelných zdrojů. Jedno z nejvíce zasažených odvětví je automobilový průmysl. Jako možná alternativa dnes nejvyužívanějších paliv je elektrická energie, ta je také čím dál více využívána a automobilové koncerny vynakládají nemalé úsilí na vývoj elektromobilů. Mezi největší nedostatky tohoto zdroje patří především skladování paliva a s tím spojený i dojezd na jedno nabití. Tento nedostatek je částečně možné řešit využitím jinak nevyužitých energií.

Jelikož se s elektromobily setkávám i v pracovním prostředí, rozhodl jsem se v této práci ověřit jaké množství energie je možné získat z vibrací. Při jízdě po nerovné vozovce, akceleraci či brždění, tlumiče pohlcují energii, která je dále nevyužita. I přesto, že existují různé metody, jak energii tlumičů převést na energii elektrickou, nejsou u dnešních elektromobilů využívány.

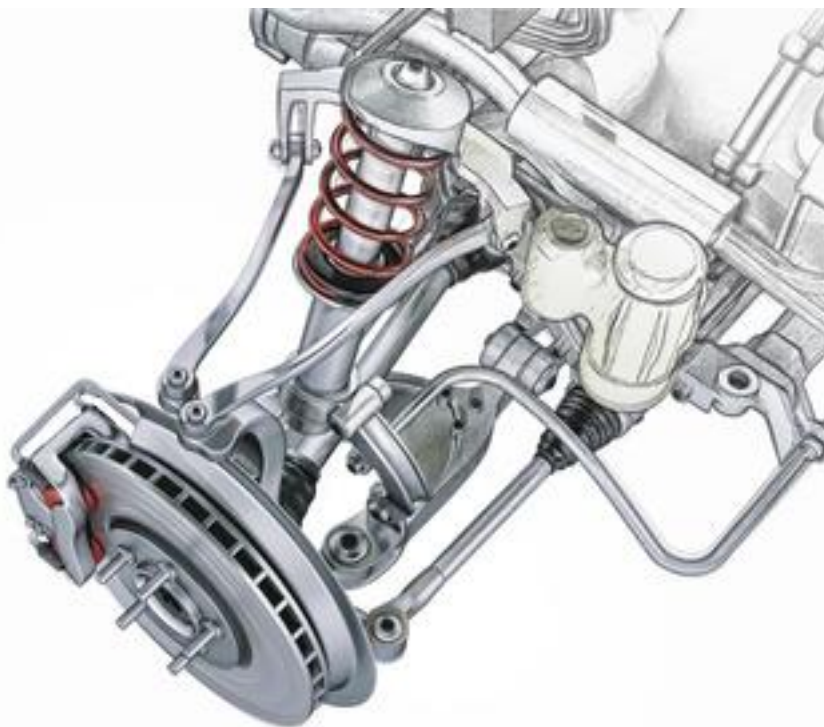
Ve své práci přiblížím existující koncepty regenerativních tlumičů a na zjednodušeném modelu provedu výpočet pro odhad výkonu. Dále na koncepčním návrhu ověřím ekonomičnost provozu a zhodnotím, zda regenerativní tlumiče mají své uplatnění v běžném provozu.

1 ODPRUŽENÍ OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ

Důležitou součástí osobního automobilu je jeho odpružení, to zajišťuje komfort řidiče a ve velké míře se podílí na ovladatelnosti vozidla. Odpružení se nachází mezi nápravou a karoserií, kde je jeho úkolem pohltit energii, kterou náprava dodala nerovnost vozovky. Po odpružení požadujeme dostatečnou tuhost, aby nedocházelo k naklánění vozidla při akceleraci, brždění nebo v zatáčkách, a s tím spojené zhoršení ovladatelnosti. Zároveň musí být dostatečně měkké, aby dokázalo pohltit nerovnosti a zajistilo co možná nejvyšší komfort řidiče. Většina automobilů je vybavena hydraulickým odpružením, ale používá se také pneumatické nebo listové odpružení. Listové pružiny se postupně z automobilového průmyslu vytrácejí, protože dosahují stejných účinností jako pružiny vinuté za cenu vyšší váhy. Na rozdíl od listových pružin je pneumatické odpružení na vzestupu. [22]

1.1 HYDRAULICKÉ ODPRUŽENÍ

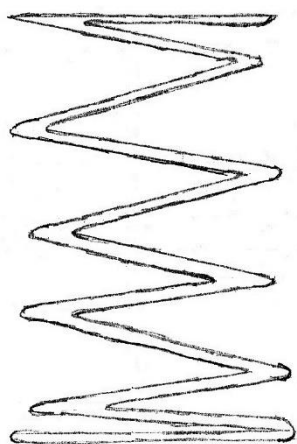
Dnes nejpoužívanější druh odpružení se skládá ze dvou základních částí: vinuté pružiny a hydraulického tlumiče. Při přjetí nerovnosti se většina energie akumuluje do pružiny, její tuhost má vliv na tuhost celého podvozku. Kdyby byla použita pouze samostatná pružina docházelo by k nežádoucímu rozkmitávání celého vozidla, proto je zde nutné přidat tlumič, který akumulovanou energii pohltí.



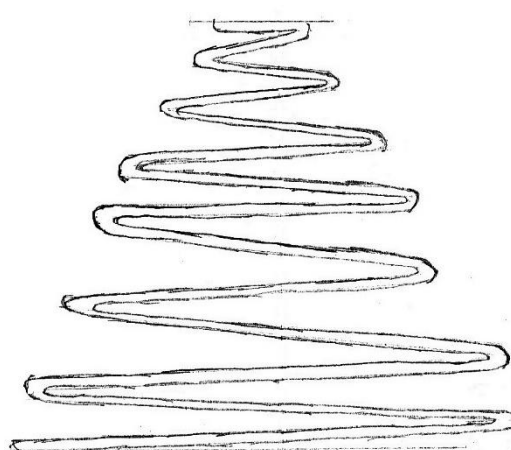
obr. 1 Zavěšení tlumiče [16]

Nejpoužívanější pružiny jsou vinuté ocelové pružiny pro svou nenáročnost jak na konstrukci, tak i na údržbu. Výhradně se jedná o pružiny tlačné s kruhovým průřezem. Jejich specifické vlastnosti jsou charakterizovány stupněm stoupání vinutí a průměru drátu, z toho vychází tuhost pružiny k . Průběh pružení je závislý na konstrukci pružiny, ta může být lineární nebo progresivní. U lineární pružiny je přítlak ve všech místech stejný, v případě progresivní pružiny se mění s jejím postupným stlačováním. Progresivity je dosaženo změnou tloušťky drátu nebo změnou stoupání vinutí. [16]

Lineární pružina



Progresivní pružina

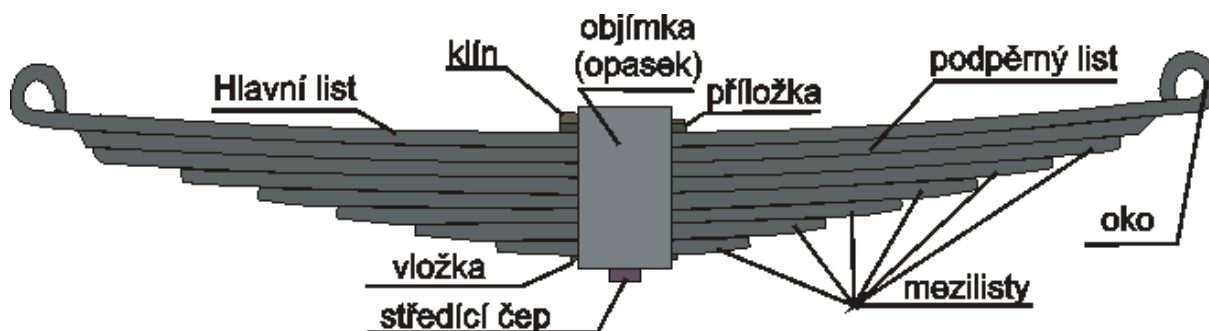
*obr. 2 Pružina lineární, pružina progresivní [16]*

Další důležitou součástí odpružení jsou tlumiče, které jsou již o poznání na konstrukci komplikovanější. Nejčastější konstrukční variantou je tlumič dvouploškový dvojčinný nebo jednoploškový dvojčinný, kterým se budu více věnovat v kapitole 3.1. Koncepční návrh.

*obr. 3 Řez reálným tlumičem [17]*

1.2 LISTOVÉ ODPRUŽENÍ

Listové pružiny se již z automobilů vytrácí a jsou nahrazovány pružinami vinutými. Jejich výhodou oproti vinutým pružinám je, že dokáží přenášet velká zatížení, díky tomu jsou stále používána u nákladních vozidel, přívěsů. Jejich nevýhodou jsou velké konstrukční rozměry a velká hmotnost. Listová pružina je zde také tlumena hydraulickým tlumičem. [16]



obr. 4 Listová pružina [18]

Listová pružina je tvořena listy o stejné tloušťce, ale různých délkách. Hlavní list je opatřen oky, které se používají k upnutí pružiny. Listy jsou vzájemně spojeny třmeny, tak aby byla umožněna změna délky pružiny, ale aby nedocházelo k vybočování jednotlivých listů. Zamezení posunu listů v podélném směru je zajištěno středícím čepem. Způsobů umístění pružiny existuje více, nejčastěji však bývá nejdelší list nahoře a k nápravě je ukotvena středem. Konce pružiny jsou pak uchyceny na konstrukci: jeden konec pevně otočně, druhý bývá ukotven otočně s možným posuvem. Aby byl snížen vnitřní odpor, vkládají se mezi jednotlivá pera plastové vložky nebo jsou broušena do hladka a namazána tukem. [11]

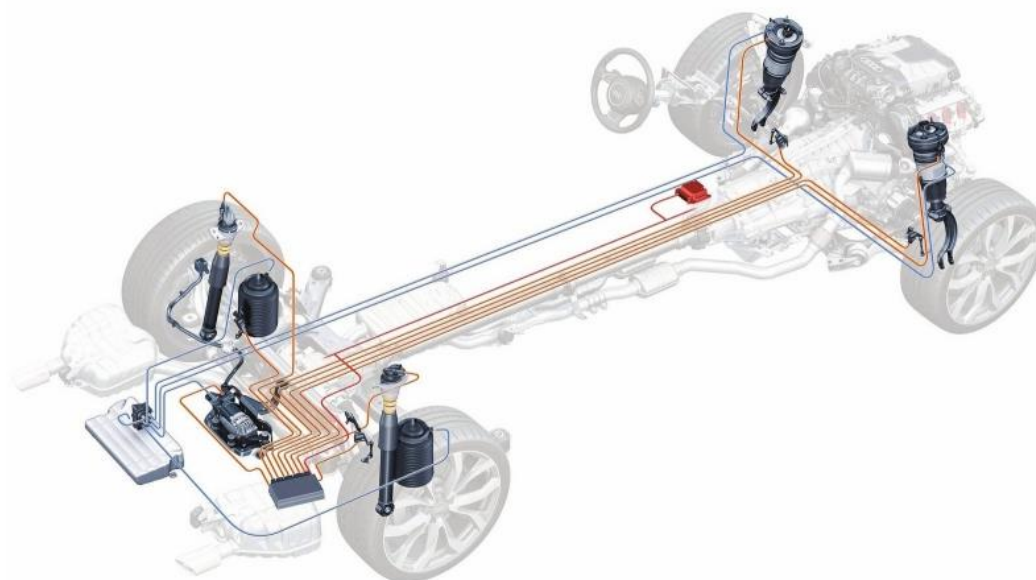


obr. 5 Použití listové pružiny v praxi [24]

1.3 PNEUMATICKÉ ODPRUŽENÍ

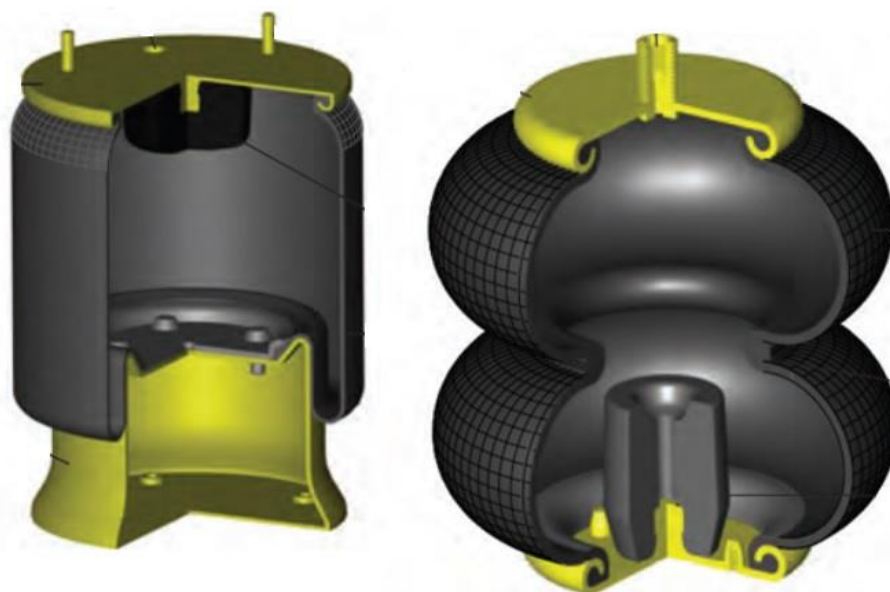
Na rozdíl od hydraulického nebo listového odpružení je možné regulovat chování pneumatického odpružení v reálném čase. Tím se zvyšuje jak komfort řidiče, tak i bezpečnost jízdy. Tento druh odpružení je stále spíše výhradou luxusnějších vozů, to především z důvodu někdy až řádově vyšší ceny. I přes to se můžeme s pneumatickým odpružením setkávat častěji než před několika lety. [1]

Systém pneumatického odpružení patří mezi konstrukčně složitější, to se promítá do vyšší hmotnosti systému. Skládá se ze vzduchové pružiny, hydraulického tlumiče, regulačních ventilů, komponentů pro zásobování vzduchem a řídicím systémem.[1]



obr. 6 Pneumatické odpružení v osobním automobilu [6]

Vzduchové pružiny využívají pružností plynů, většinou vzduchu, nebo dusíku. Plyn je naplněn v měchách. Měch může být zavinutý nebo jednoduchý. Zavinutý typ se používá, pokud je nutné uspořít místo, protože je prostorově méně náročný. Jednoduchý typ má zase výhodu lepší možnosti naladění na požadované vlastnosti. O tlak v pružinách se stará vysokotlaký kompresor. U starších typů nebo spíše u nákladních vozidel se využívá otevřený okruh, kde je vzduch nasáván z okolí nebo do okolí vypouštěn. Novější osobní automobily většinou používají uzavřený okruh, ve kterém se plyn uchovává v nádrži, z nádrže je buď odebrán pro natlakování pružin nebo poslán zpátky při ufouknutí. Uzavřený okruh má výhodu rychlejších reakcí, tiššího chodu a lepší efektivitu systému. Kompresor je poháněn přímo motorem nebo je připojený na řemenici, v automobilu se nachází v motorové části. [15]



a) jednoduchý měch

b) zavinutý měch

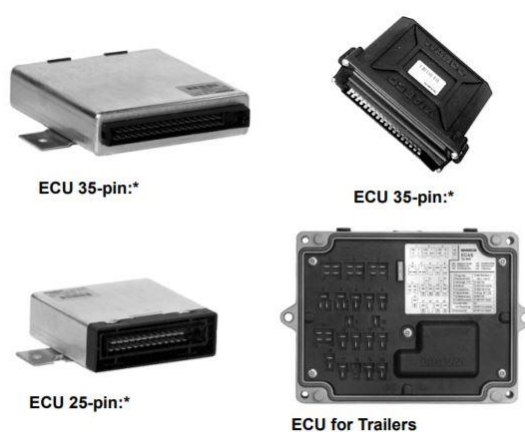
obr. 8 Typy měchů [25]*obr. 7 Kompresor Mercedes Benz [29]*

Správné nastavení tlumičů je regulováno ventily, které jsou řízeny řídicí jednotkou. Regulační ventily máme výškové nebo vzduchové. Výškový ventil slouží k regulaci světlé výšky vozidla a její stabilizaci při jízdě. Je upevněný na rámu vozidla a propojený s nápravou tak, aby mohl během změny vzdálenosti rámu od nápravy regulovat průchod vzduch mezi nádrží a měchem. Vzduchový ventil reguluje distribuci a izolaci vzduchu v celém systému. V moderních odpruženích je používáno více elektromagnetických ventilů. [14]



obr. 9 Elektromagnetické ventily [2]

Aby mohla řídicí jednotka správně fungovat, je nutné, aby měla dostatečný počet vstupních dat. To zajišťují senzory polohy, výšky, tlaku a nerovnosti vozovky. Díky těmto datům dokáže řídicí jednotka v reálném čase vyhodnotit vstupy od senzorů a porovnávat s daty uloženými v databázi. Podle toho vyhodnocuje vhodnost nastavení pružiny a rozesílá pokyny do systému. [2]



obr. 10 Řídicí jednotka [2]

2 PŘEDSTAVENÍ KONCEPTŮ

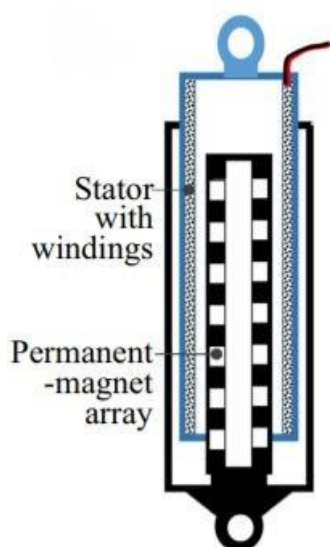
První výzkumy o získávání elektrické energie z vibrací začali již před více než 15 lety, z počátku za účelem napájení aktivního ovládání tlumičů, později i pro dobíjení baterie v hybridních či elektrických automobilech. V dnešní době existuje mnoho konceptů, které dokáží převádět energii z vibrací na energii elektrickou, ty můžeme rozdělit do 2 základních skupin. Regenerativní tlumiče využívající lineární pohyb nebo pohyb rotační. [8]

2.1 REGENERATIVNÍ TLUMIČE VYUŽÍVAJÍCÍ LINEÁRNÍ POHYB

Tlumiče samy o sobě konají lineární pohyb, a proto tento typ regenerativních tlumičů není tak náročný na konstrukci. Využívají permanentního magnetu a vinutí. Nevýhodou těchto tlumičů je malá účinnost.

2.1.1 REGENERATIVNÍ HYDRAULICKÝ TLUMIČ

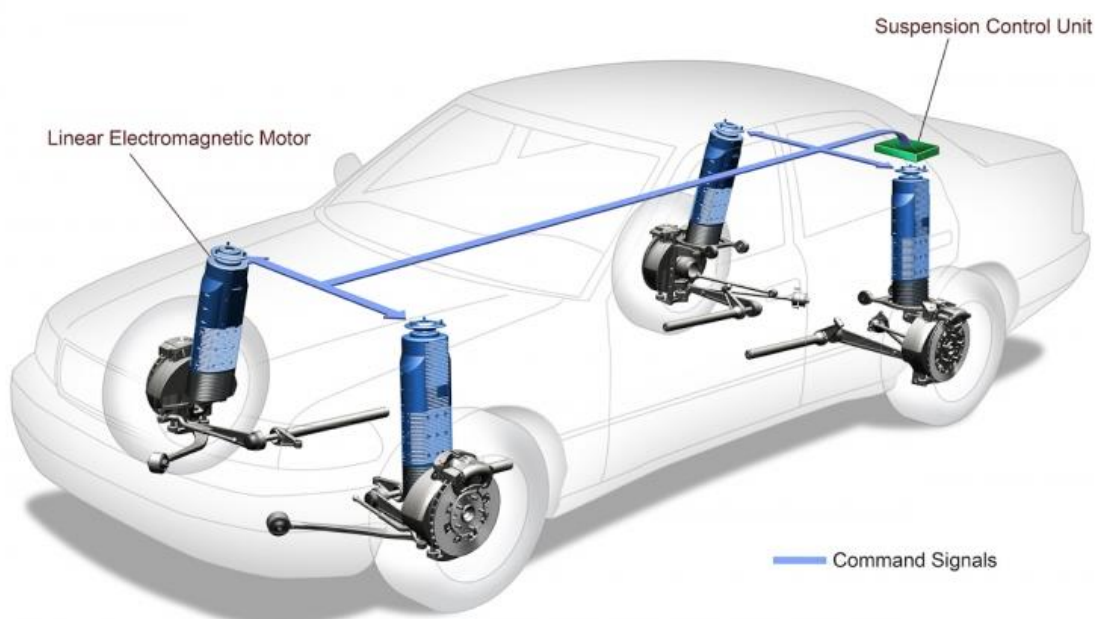
Tlumič byl vyvinut na univerzitě Tufts profesorem Ronaldem Goldnerem a jeho kolegou Petrem Zerigian. Jde v podstatě o stejný hydraulický tlumič, který je běžně v automobilech používán, jediným rozdílem je použití permanentního magnetu a vinutí v obalu tlumiče. Nepohyblivá část je opatřena magnetem a pohyblivá vinutím. Pohybem vinutí kolem permanentního magnetu se ve vinutí indukuje napětí. Vinutí je napojeno na uzavřený obvod, proto se zde začne indukovat také proud. Takto vyrobenou elektrickou energii je možné v automobilu dále využít. Tlumiče byly optimalizovány a otestovány na 1,1 t vážícím vozidle při průměrné rychlosti 64 km/h. Bylo zjištěno, že dokáže využít 20-70% jinak ztracené energie, procentuální využití závisí od typu vozovky a rychlosti automobilu.[10][13]



obr. 11 Zobrazení lineárního regenerativního tlumiče v řezu [2]

2.1.2 BOSE

Firma Bose známá především jako výrobce kvalitních reproduktorů od 80. let tajně vyvíjela aktivní regenerativní tlumiče. Svůj tajný projekt představila v roce 2004. Stála tak za vznikem elektromagnetických lineárních tlumičů, které dokáží efektivně získávat elektrickou energii a zároveň zkombinovat tuhost podvozku s pohodlím pasažérů. Místo klasických tlumičů a pružin je použit lineární elektromagnetický motor, zesilovač proudu a řídicí jednotka. Tlumiče neobsahují pružinu ani tlumicí olej, proto jsou schopny reagovat téměř okamžitě na nerovnosti. Odpružení Bose se řadí mezi jedny z nejlepších doposud vyvinutých tlumičů. Velmi dobře dokáží oddělit karoserii od kol, a tím zajistit jak komfort tak v podstatě nulové naklánění automobilů při zatáčení a to má velmi pozitivní vliv na ovladatelnost vozidla. Velkou nevýhodou a možná i důvodem, proč odpružení není využíváno v automobilech, je vysoká hmotnost společně s vysokou cenou. Podobný systém je firmou Bose dodáváný do nákladních automobilů, kde slouží k odpružení sedačky řidiče a pomáhá tak chránit páteř řidiče.[20][27]



obr. 12 Odpružení Bose použito v automobilu [20]

2.2 REGENERATIVNÍ TLUMIČE VYUŽÍVAJÍCÍ ROTAČNÍ POHYB

Na tomto principu je založeno více konceptů, a to právě z důvodu účinnosti. Převod přímého pohybu na rotační bývá proveden pomocí kapaliny, ozubení nebo speciálně pracujícího tlumiče(eRot).

2.2.1 GENSHOCK

Společnost Levant Power ve spolupráci s ZF Friedrichshafen jako první na světě vyvinula plně aktivní regenerativní tlumiče zvané Genshock, které jsou zaměřené pro osobní automobily. Jedná se spíše o součástku, která je přidána ke klasickým tlumičům. Jejím základem je řídicí jednotka, elektromotor a zubové čerpadlo. Celá sestava je zvnějšku připojena na tlumič a na základě pokynů elektroniky reguluje průtok oleje tlumičem. Tímto pozitivně ovlivňuje chování tlumiče při brždění, akceleraci a v zatáčkách. To způsobuje, že u automobilu nedochází k nežádoucím náklonům karoserie. V moment, kdy řídicí jednotka vyhodnotí, že nejsou potřeba aktivní zásahy, přepne systém do regenerativního módu. V regenerativním módu olej pohání elektromotor skrze zubové čerpadlo, který se tak stane generátorem a dodává elektrickou energii do systému. Takto vyrobenou elektrickou energii lze využít například pro dobíjení baterie. [7]



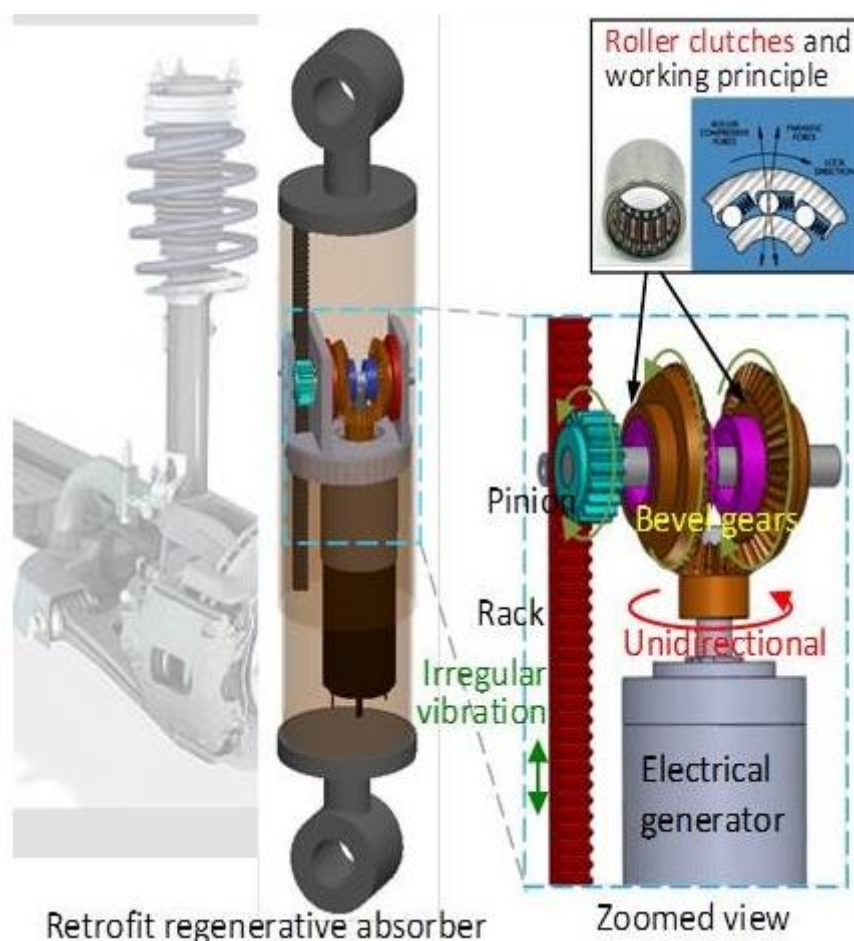
obr. 13 Genshock přidavný prvek [7]

2.2.2 RETROFIT

Jedná se o koncept univerzity Stony Brook vedený profesorem Lei Zuo, který je unikátní tím, že je založený na pohybovém mechanickém usměrňovači (MMR - mechanical motion rectifier). Usměrňovač dokáže nepravidelné oscilující kmity převést na stálé jednosměrné otáčky pohánějící generátor. To má za následek vysokou efektivitu. Skládá se ze 3 kuželových ozubených kol, dvě jsou připojena na hřídel jednosměrnými ložisky, každé kolo do jiného směru. Díky jednosměrným ložiskům je třetí kuželové kolo roztáčeno pouze jedním směrem a to zajistí, aby bylo poháněno při obou směrech pohybu tlumiče. Třetí ozubené kolo je pevně spojeno s hřídelí vedoucí do generátoru. Generátor je tedy roztáčen v jednom směru bez ohledu na směr pohybu tlumiče. [4]

Mezi výhody konceptu Retrofit patří[4]:

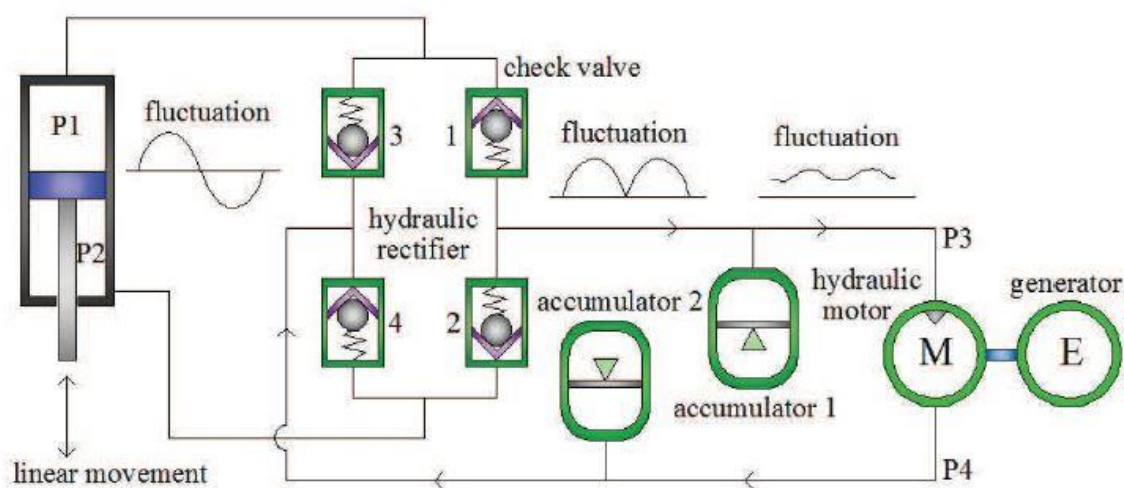
- účinnost 60-80%(testováno na SUV)
- jednoduchá regulace tuhosti změnou elektrického zatížení
- je lehčí než klasické olejové tlumiče



obr. 14 Regenerativní tlumič retrofit [4]

2.2.3 HESA

Na technické univerzitě Wuhan pod vedením Zhigang Fang vznikl projekt zvaný HESA. Ke klasickému hydraulickému tlumiči byl připojen systém (viz. Obr.4.), který využívá pohybu tlumiče pro generaci elektrické energie. Z každé komory (horní, spodní) tlumiče je vývod, kterým při pohybu tlumiče proudí tlumící olej. Olej proudí do systému obsahujícího zpětné klapky, 2 akumulátory, hydraulický motor a generátor. Zpětné klapky zajišťují roztáčení hydraulického motoru v jednom směru a zároveň umožňují využít oba směry pohybu tlumiče. Jelikož kmitání tlumičů je kolísavé, jsou zde akumulátory, které zajišťují plynulý záběr hydraulického motoru a tím zvyšují účinnost generátoru. Důležité pro správnou funkčnost je odvzdušnění systému a těsnost vývodů, hadicových spojů, zpětných klapek. [3]



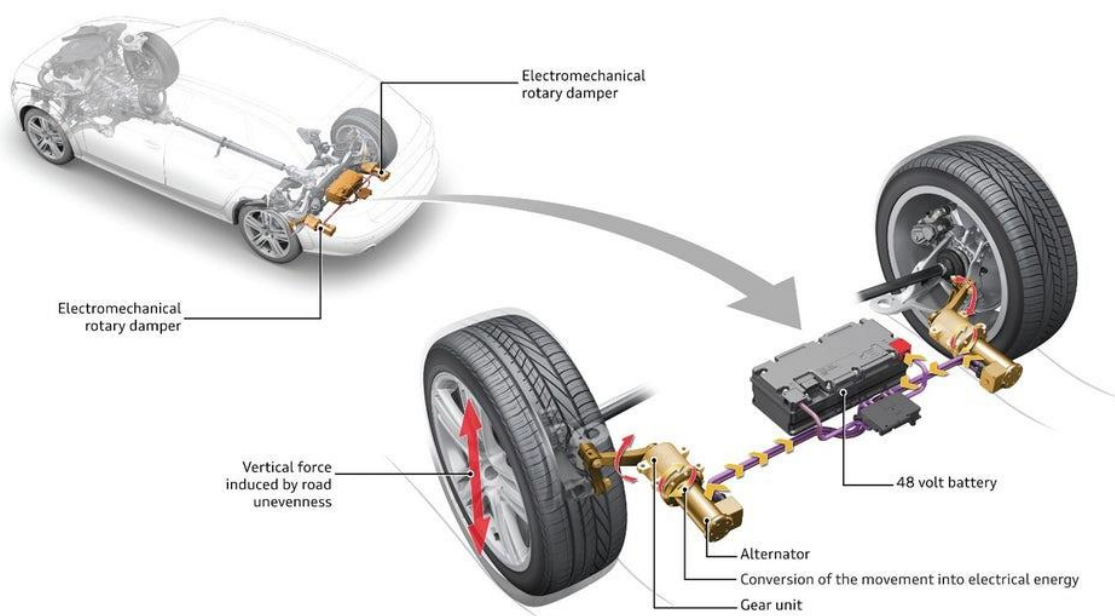
obr. 15 Schéma HESA [3]

2.2.4 eRot

Jedná se o jeden z nejmladších prototypů, na jehož vývoji pracuje Audi. Tlumiče eRot jsou elektromechanické tlumiče, které nahrazují dosavadní hydraulické tlumiče. Jsou navrženy pro auta, které fungují na 48V elektrickém obvodu, kde dokáží dobíjet baterii a odlehčit práci alternátoru. Celý systém se skládá z planetové převodovky, na kterou je pomocí ramen upevněno kolo, k převodovce je připojen alternátor starající se o převod pohybu na elektrickou energii, ta je dále přivedena na 48V baterii. Tuhost a fungování tlumičů je možné aktivně řídit, aby se co nejlépe přizpůsobily vozovce a nerovnostem. Výhodou je i horizontální uložení tlumičů, čímž se šetří prostor v okolí zavěšení, které se dá využít například jako úložný prostor. [9][21]

Electromechanical rotary damper

08/16



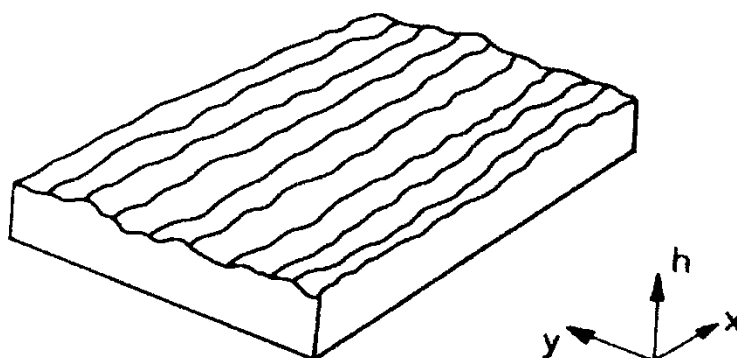
obr. 16 eRot tlumič [21]

3 VÝPOČET PRŮBĚHU STLAČOVÁNÍ TLUMIČŮ

Aby bylo možné zjistit realitě co nejvěrnější chování tlumičů, je nutné nejdříve vytvořit simulaci reálného profilu vozovky. Parametry dnešních silnic byly experimentálně naměřeny a zaznamenány do dokumentu ISO8608:2016, kde jsou vozovky rozděleny na 8 typů A-H. Z toho jsem vybral typ A jako silnici první třídy(dálnice), typ C jako silnici 2. třídy a typ F jako nepevněnou cestu. Tyto data je možné využít jako vstupní do čtvrtinového modelu automobilu, a tak dopočítat pohyby tlumiče při jízdě po vozovce různého typu. [19]

3.1 PROFIL POVRCHU VOZOVKY

Profil povrchu vozovky je jedním z hlavních faktorů působících na tlumiče. Jelikož se automobil pohybuje po vozovce, na které nerovnosti mají nahodilý charakter, je nutné znát statistické vlastnosti nerovností. Výška nerovností h se obecně vyjadřuje v závislosti na souřadnicích v podélném směru x a y ve směru příčném. [12]



obr. 17 Znáznornění výšky nerovností v rovině x, y [12]

Kde x je ve směru jízdy a y kolmo na směr jízdy. Pro určení nerovností působících na kola automobilu stačí znát pouze $h(x)$ pro stopu levou a $h(x)$ pro stopu pravou. Pro výpočet energie na čtvrtinovém modelu, který obsahuje pouze jednu čtvrtinu auta, tedy jedno kolo je nutné znát pouze $h(x)$ jedné ze stran. [12]

V normách ISO 8608 jsou nerovnosti pro různé typy vozovek uvedeny jako spektrální hustota nerovností $G_d(\Omega)$ pro úhlovou frekvenci, nebo $G_d(n)$ pro prostorovou frekvenci. Výchozí úhlová frekvence má hodnotu $\Omega = 1 \text{ rad/m}$, výchozí prostorová frekvence je $n_0 = 1 \text{ m}^{-1}$. [19] [12]

Tab. 1 Spektrální hustoty nerovností pro vozovky A,C,F [19]

Typ vozovky	$G_d(n) [10^{-6}\text{m}^3]$ [19]
A	16
C	256
F	16 384

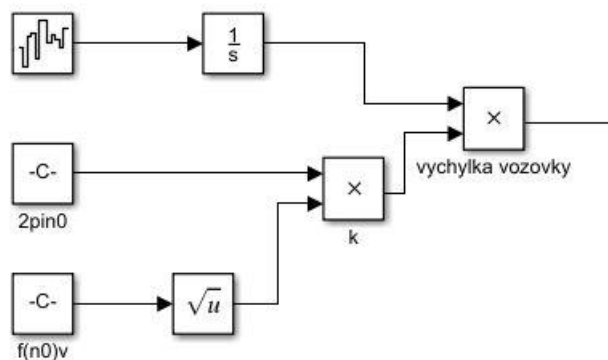
Pokud vozidlo jede konstantní rychlostí, je možné profil vozovky vyjádřit podle tzv. bílého šumu. Pro výpočet bílého šumu jsem využil rovnice [23]:

$$h(t) = \sqrt{k} \int_0^t w(t) dt, \quad (1)$$

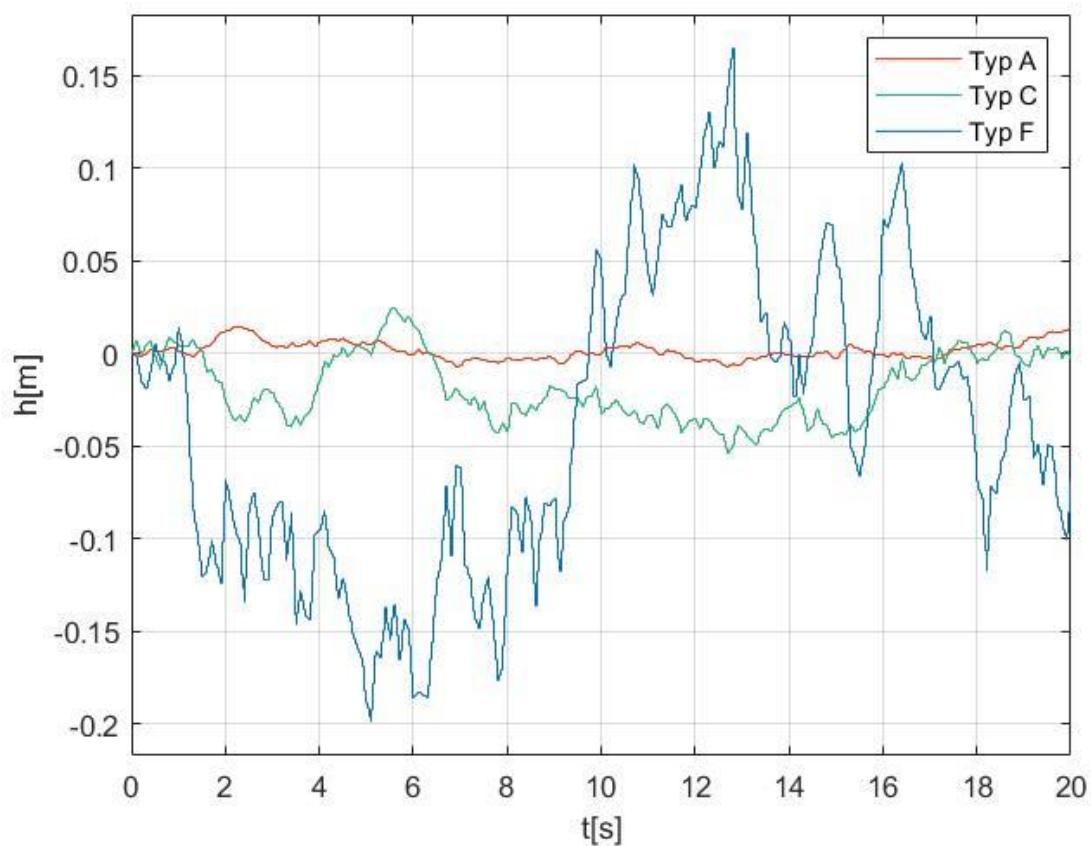
kde $h(t)$ je výška nerovnosti, $w(t)$ je bílý šum, a k vyjadřuje spektrální hustotu nerovností závislou na rychlosti vozidla $v[\text{m/s}]$, kterou můžeme vypočítat následovně [23]:

$$k = 4\pi^2 n_0^2 G_d(n_0) v \quad (2)$$

Pro výpočet profilu vozovky pomocí bílého šumu jsem využil program Matlab/Simulink, prostřednictvím kterého jsem zjistil profily různých typů vozovek. Zvolené rychlosti jsou typické pro třídy silnic. Pro silnici typu A jsem zvolil rychlost 130 km/h, silnice C 90 km/h a pro silnici F 30 km/h.



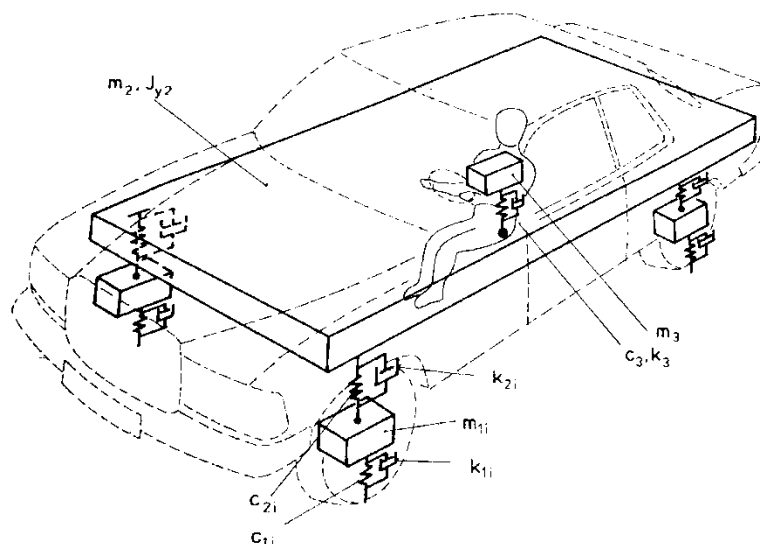
obr. 18 Schéma výpočtu profilu vozovky Simulink



Graf 1 Profily vozovky pro různé typy

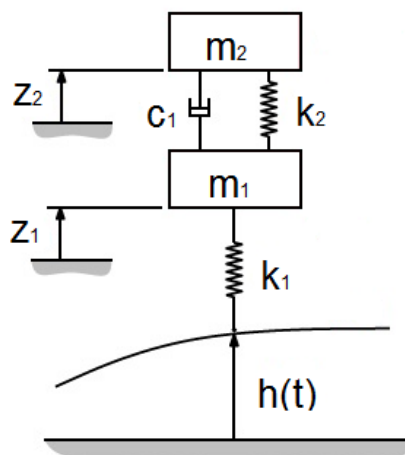
3.2 ČTVRTINOVÝ MODEL AUTOMOBILU

Výpočet energie, která je pohlcena tlumiči, začíná sestavením dynamického modelu automobilu. Vycházíme z dynamického modelu úplného vozidla *obr. 19*. Relativně jednoduchý model, který je ale na výpočet velmi komplikovaný. Z důvodu komplikovanosti výpočtu u úplného modelu existují model poloviční a model čtvrtinový. Čtvrtinový model se na rozdíl od úplného zabývá jedním kolem vozidla. [12]



obr. 19 Jednoduchý prostorový dynamický model odpružení automobilu [12]

Pro můj výpočet jsem zvolil čtvrtinový model automobilu, který je dostatečně přesný a zároveň jednoduchý. Dynamický model se skládá ze dvou pružin, jednoho tlumiče, odpružené a neodpružené hmoty *obr. 20*. Pružina k_1 představuje pneumatiku. Tlumení pneumatiky je velmi malé, proto jej můžeme zanedbat. Pružina k_2 je pružinou automobilu a je tlumena tlumičem c_1 . Odpružená hmotnost m_2 je čtvrtina hmotnosti automobilu tj. odpružená hmota, do které není započítána hmotnost kola, pneumatiky, ložiska, a další části kola a jeho zavěšení. Tato nezapočítaná hmota se nazývá neodpružená hmotnost m_1 .



obr. 20 Dynamický čtvrtinový model automobilu [5]

Nejprve je nutné sestavit kinetickou energii, energii pružiny a tlumící energii. Pro čtvrtinový model automobilu energie vypadají následovně:

kinetická energie

$$E_k = \frac{1}{2} m_2 \dot{z}_2^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{z}_1^2, \quad (3)$$

dále energie pružiny:

$$E_p = \frac{1}{2} k_2 (z_2 - z_1)^2 + \frac{1}{2} k_1 (z_1 - h(t))^2, \quad (4)$$

tlumící energie

$$E_b = \frac{1}{2} c_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1)^2, \quad (5)$$

Provedením příslušných derivací podle proměnných z_1 , z_2 a následné úpravě získáme pohybové rovnice čtvrtinového modelu:

$$m_2 \ddot{z}_2 + k_2 \cdot (z_2 - z_1) + b \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = 0, \quad (6)$$

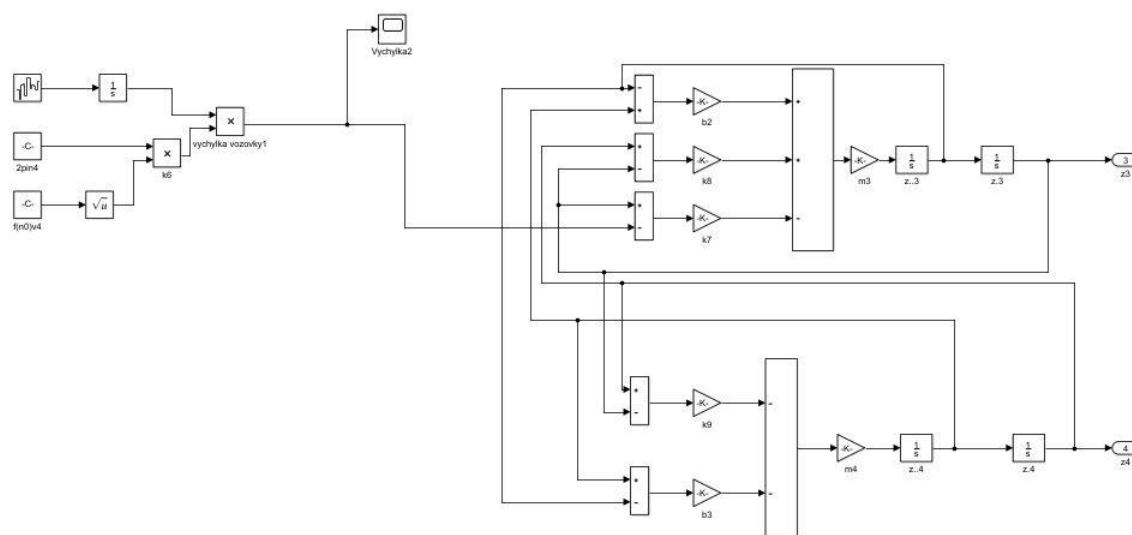
$$m_1 \ddot{z}_1 + k_1 \cdot (z_1 - h(t)) - k_2 \cdot (z_2 - z_1) - b \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = 0 \quad (7)$$

Nyní je nutné zvolit parametry vozidla, pro běžný osobní automobil jsem zvolil:

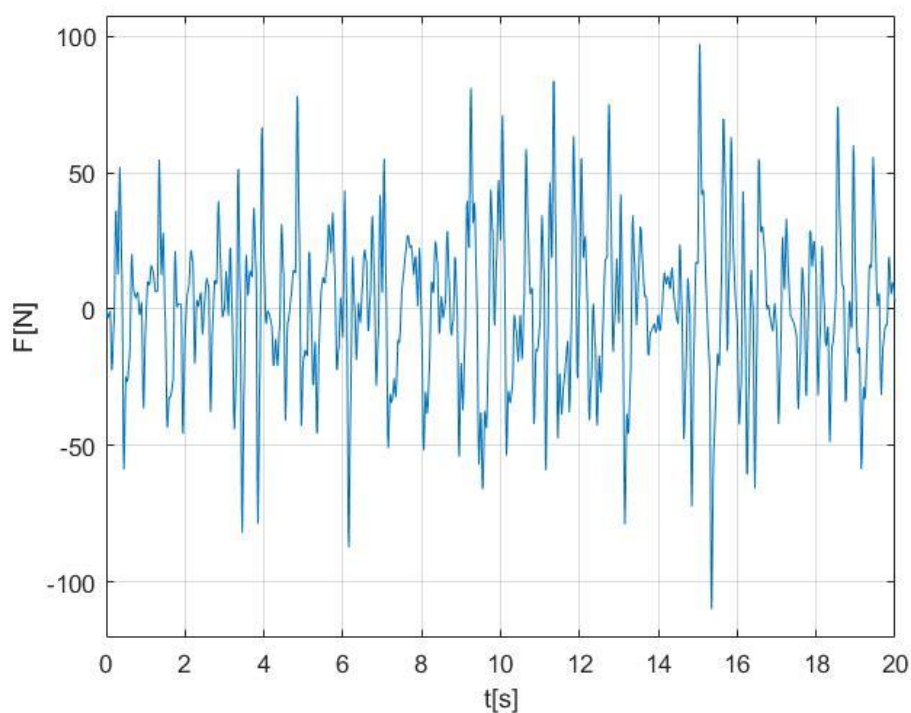
Tab. 2 Vstupní parametry

Neodpružená hmotnost	$m_1 = 50kg$
Odpružená hmotnost	$m_2 = 350kg$
Tuhost pneumatiky	$k_1 = 200N/mm$
Tuhost pružiny	$k_2 = 22N/mm$
Koeficient tlumení tlumiče	$c = 1500N/ms$

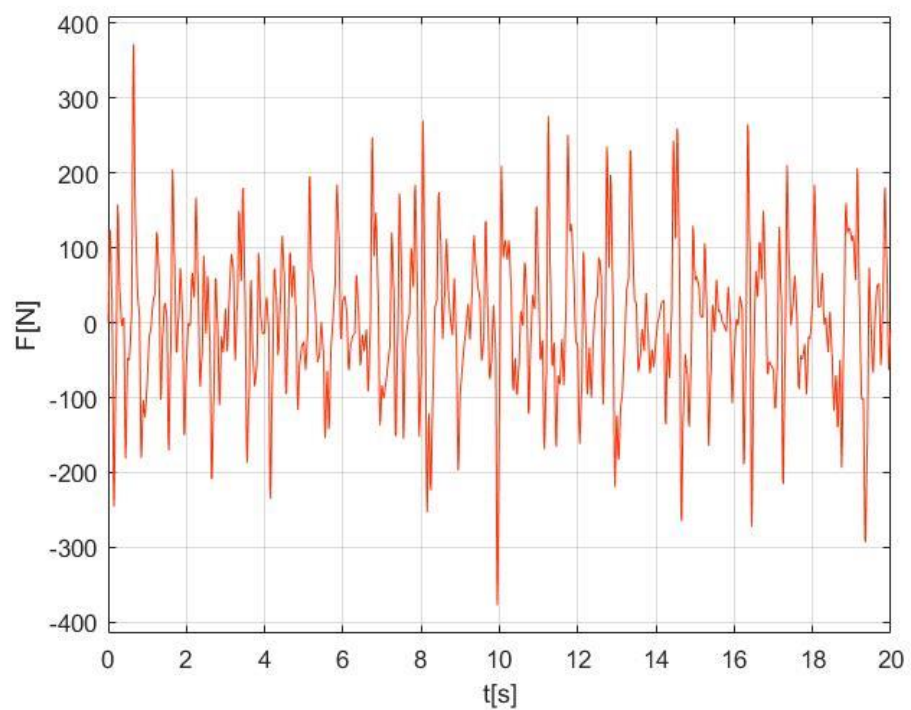
Pro výpočet jsem opět využil Matlab/Simulink, ve kterém jsem sestavil pohybové rovnice se vstupem profilu vozovky *obr. 12*, a tím jsem zjistil sílu a pohyby na tlumiči v závislosti na čase. Výpočty jsem opět provedl pro tři různé typy silnic A, C, F.



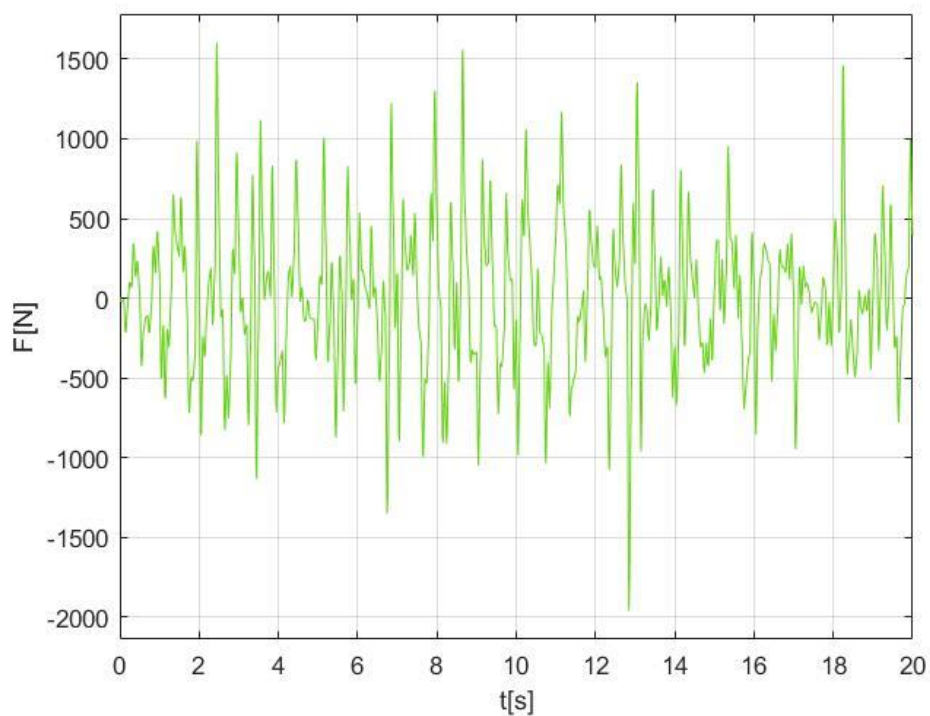
obr. 21 Čtvrtinový model sestavený v Matlab/Simulink



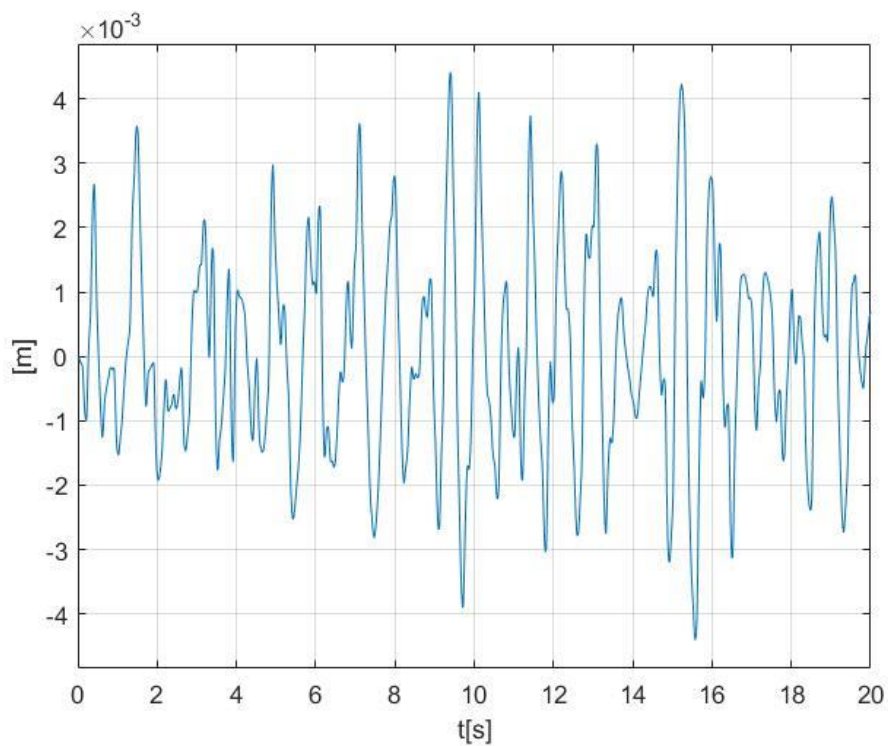
Graf 2 Průběh síly v tlumiči na vozovce typu A



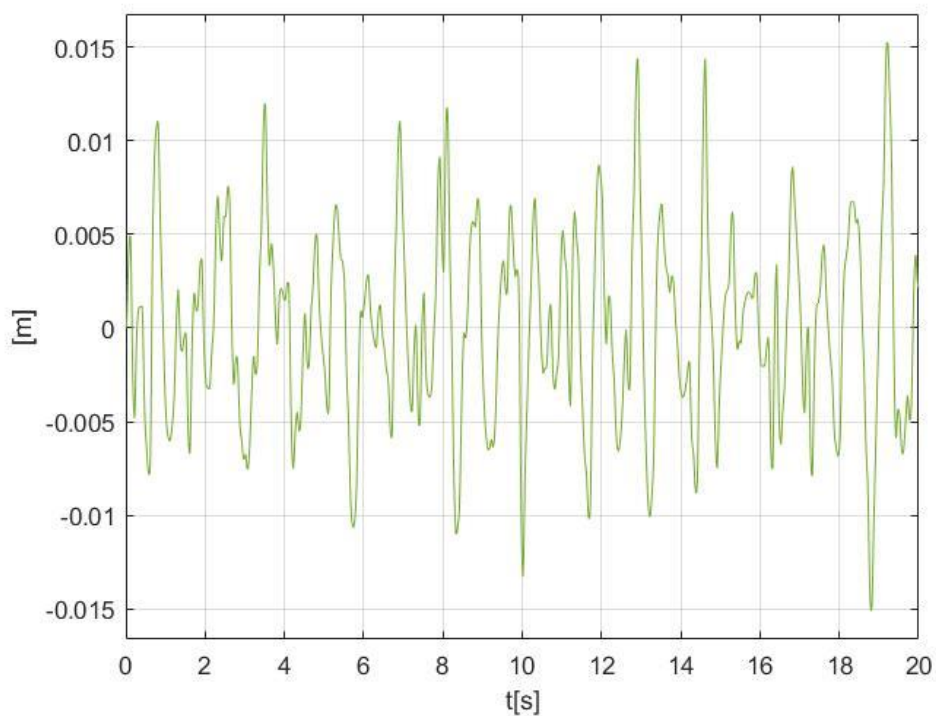
Graf 3 Průběh síly v tlumiči na vozovce typu C



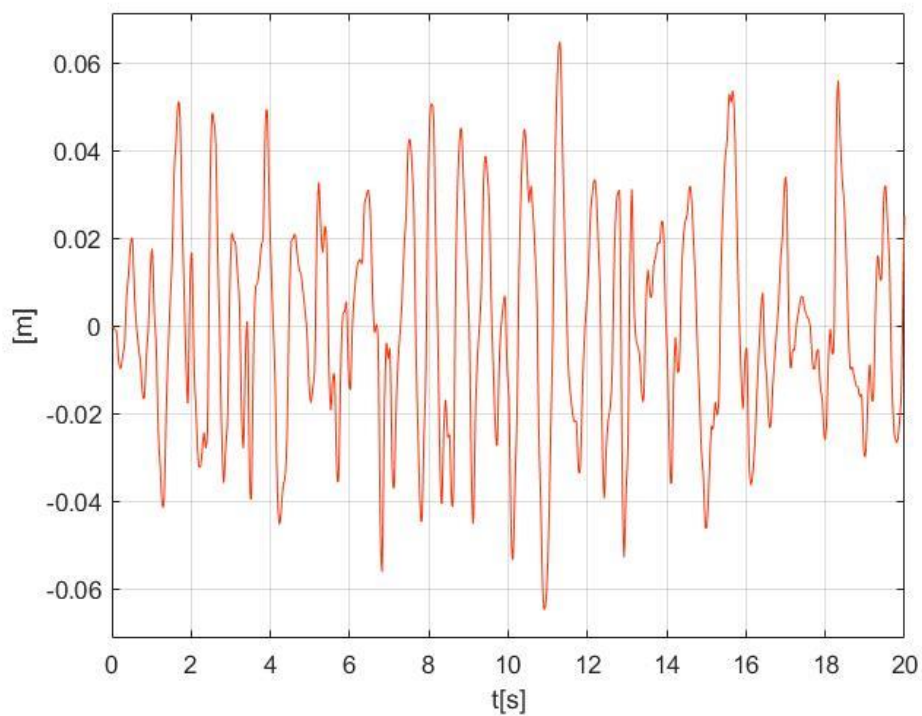
Graf 4 Průběh síly v tlumiči na vozovce typu F



Graf 5 Průběh stlačení a roztažení tlumiče na vozovce typu A



Graf 6 Průběh stlačení a roztažení tlumiče na vozovce typu C



Graf 7 Průběh stlačení a roztažení tlumiče na vozovce typu F

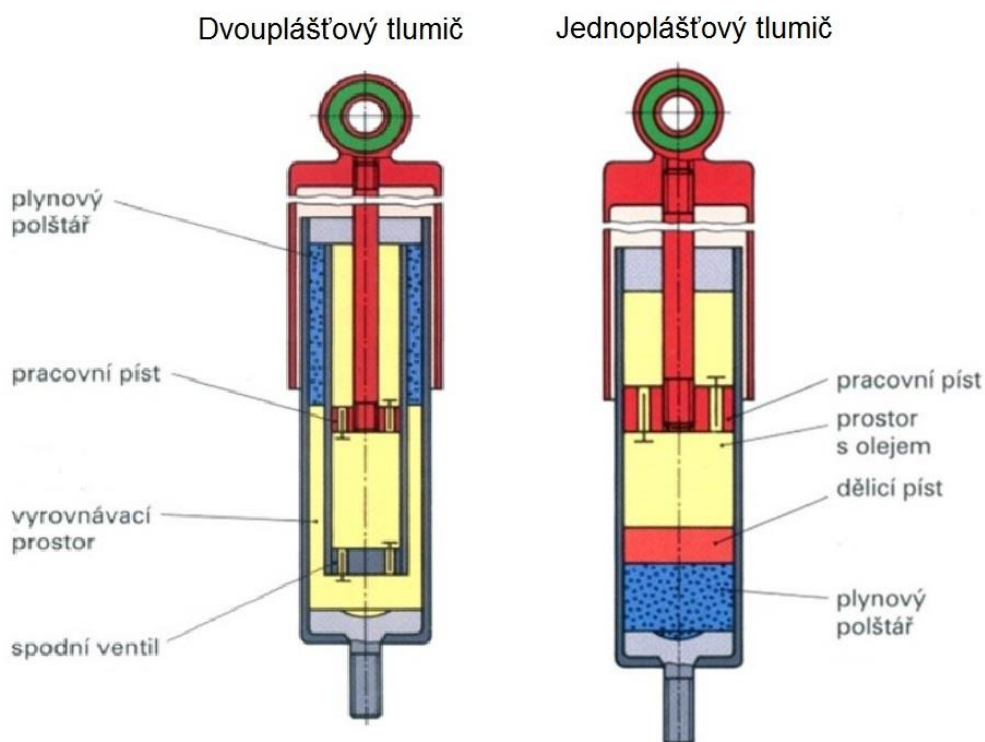
4 KONCEPČNÍ NÁVRH A JEHO MOŽNÝ ZISK ENERGIE

U koncepčního návrhu se zaměřím na regenerativní tlumič, jehož základem je hydraulický tlumič, a s ohledem na jeho konstrukci vypočítám možný zisk energie.

4.1 KONCEPČNÍ NÁVRH

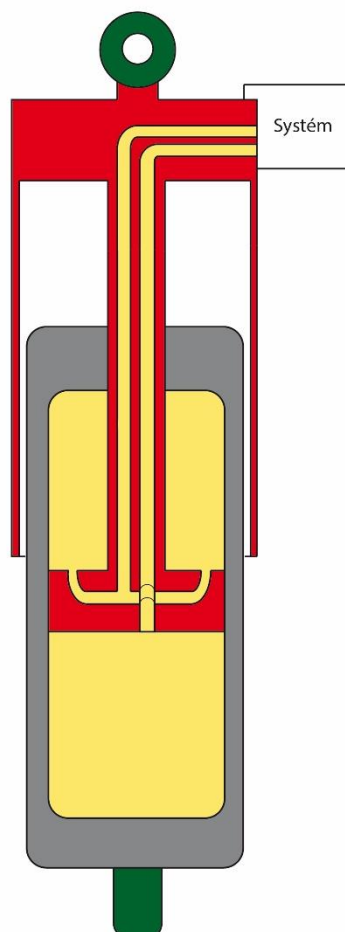
Kombinace pružiny a hydraulického tlumiče je v dnešní době nejpoužívanější typ odpružení u osobních automobilů. Proto budu při koncepčním návrhu vycházet právě z tohoto typu odpružení. Mezitím, co pružina přeměňuje energii kinetickou na energii pružiny, tlumič zde slouží k maření těchto energií za účelem komfortu řidiče. Zaměřím se tedy pouze na tlumič.

Dnes používané hydraulické tlumiče je možné rozdělit do dvou základních skupin: na tlumič jednoplášťový a tlumič dvouplášťový. Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma tlumiči je umístění plynového polštáře. U dvouplášťového tlumiče je nevýhodou, že tlumič může být použit pouze svisle tak, aby se plyn nemohl dostat do pracovního válce tlumiče. To by způsobilo zpěnění oleje a vynechávání tlumení. Jednoplášťový tlumič má plyn od pracovní komory oddělen dělicím pístem, proto je možné tlumič použít v jakékoli poloze. Plynový polštář zde plní důležitou funkci, a tou je udržování přetlaku v tlumiči a jeho vyrovnávání během tlumení, čímž se zlepšuje tlumení téměř ve všech oblastech kmitání. Další prvek ovlivňující práci tlumiče, jsou ventily umístěné v pístu. Během tlumení ventily proudí olej, a tím jejich velikost ovlivňuje charakter tlumení. [28]



obr. 22 Typy hydraulického tlumič [28]

Plynový polštář a ventily nahradím externím systémem složeným z turbíny na jedné straně a elektromotor na straně druhé. Aby bylo možné tento systém k tlumiči přiřadit, nejprve je nutné pozměnit konstrukci tlumiče. V pracovní komoře se nachází olej pod tlakem, který vyplňuje celou pracovní komoru, dále je tu píst, který na rozdíl od ventilů obsahuje kanálky, ty slouží k odvodu a přívodu oleje do systému a ze systému. Kanálky musí být dostatečně velké s co nejlepším povrchem, aby jejich vlivem nedocházelo k tlumení a byly redukovány ztráty systému.

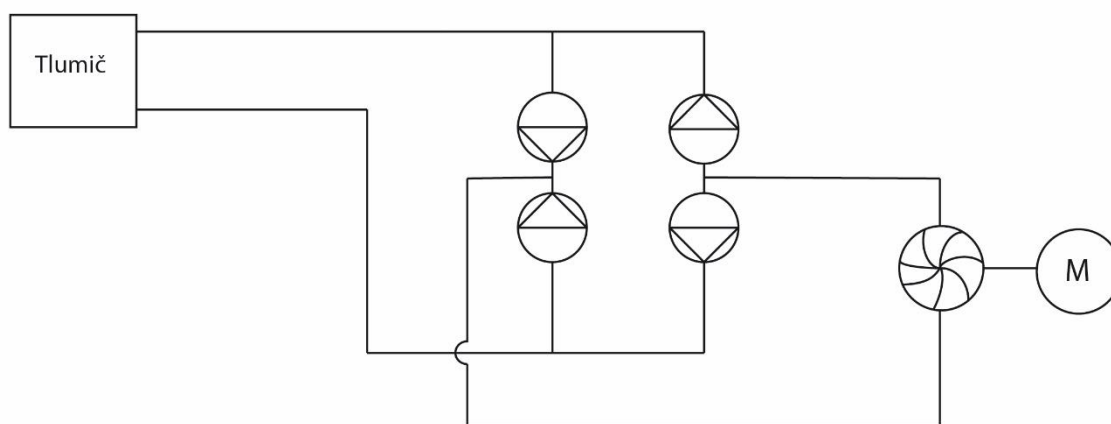


obr. 23 Konceptní návrh tlumič

System sám o sobě, jak už bylo výše zmíněno, je složen především z turbíny a elektromotoru. Dalšími důležitými prvky jsou zde zpětné klapky. Při jízdě po nerovné vozovce se tlumič pohybuje dvěma směry, ale aby bylo zajištěno efektivní roztáčení turbíny, je nutné ji roztáčet jedním směrem. O to se zde starají zpětné klapky a díky tomu dokážeme využít pohyb tlumiče v obou směrech. Trubína zajišťuje převod lineárního pohybu tlumiče na pohyb rotační, který je přenesen pomocí hřídele do elektromotoru.

Elektromotor slouží jako generátor, ale také zde zastupuje funkci ventilů. Podle vyhodnocení řídicí jednotky je zvolena tlumicí síla, která je potřeba pro komfort a zároveň dobrou ovladatelnost vozidla. Ta je zajištěna nastavením vhodné zátěže na elektromotoru, pokud tedy projíždí automobil zatáčkou na rovné vozovce, je zátěž elektromotoru co největší, aby nedocházelo k nežádoucím naklonění automobilu. V opačném případě, jede-li auto po nerovné vozovce, je zátěž elektromotoru menší, kola automobilu tak dokáží lépe kopírovat nerovnost vozovky, zvýšit trakci a snížit spotřebu. Zároveň musí být tlumení dostatečné, aby se zamezilo odskakování kola.

Pro zajištění správné funkce systému je nutné, aby byl celý systém od vzdušný a dobře utěsněný. Samozřejmostí je nutnost dosáhnout co nejlepších povrchů kanálků a zajištění co nejmenšího počtu kloubových spojů.



obr. 24 Schéma systému vyrábějícího elektrinu

4.2 MOŽNÝ ZISK ENERGIE

Za ideálních podmínek bude výroba elektrické energie záviset především na výkonu turbíny. Pro výkon turbíny je nutné znát rozdíly tlaku, to je možné spočítat pomocí plochy tlumiče a síly působící na tlumiči. Plochu tlumiče jsem volil podle standardního tlumiče používaného v osobním automobilu, který má průměr $d = 0,034m$. Plocha je tedy $S = 0,0009079m^2$.

$$\Delta p = \frac{\Delta F}{S}, \quad (8)$$

dále je nutné vypočítat průtok závislý na čase, tedy změnu objemu mezi horní a dolní částí tlumiče.

$$Q = \frac{dV}{dt}, \quad (9)$$

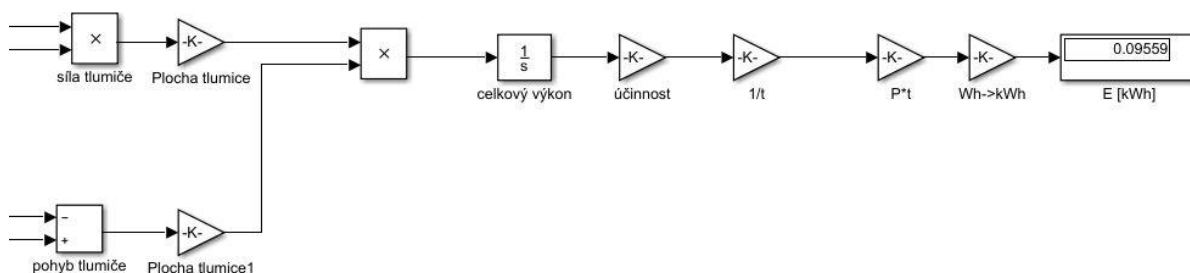
ze změny tlaku a průtoku můžeme spočítat výkon turbíny ze vztahu

$$P = \Delta p * Q * \mu, \quad (10)$$

kde μ je účinnost turbíny, jako nejvhodnější se jeví Francisova turbína, u které je udávána účinnost 82%, proto volím $\mu = 0,82$. Aby bylo možné dobře určit, jak moc efektivní systém pro elektromobil bude, je nutné zjistit kolik kWh je schopný dodat během hodiny jízdy. To vypočítám z následujícího vztahu:

$$E = P * t \quad (11)$$

Výpočty jsem provedl opět prostřednictvím Matlab/Simulink tak, že vstupy byly předchozí výpočty doplněné o plochu pístu tlumiče a účinnosti turbíny. Protože byl výpočet proveden pomocí čtvrtinového modelu automobilu vypočítaná energie E na obr. 15 odpovídá jednomu tlumiči ze čtyř.



obr. 25 Schéma výpočtu energie Matlab/Simulink

Pro lepší představu vypočítám o kolik je teoreticky možné zvýšit dojezd Tesly model S, jejíž kapacita baterie je 70kWh s udávaným dojezdem 390 km. [26]

Tab. 3 Výsledky pro celý automobil (4 tlumiče)

Typ vozovky	E= [kWh]	Zvýšení dojezdu [km]
A	0,00052	0,004
C	0,00692	0,040
F	0,38224	2,128

ZÁVĚR

Automobilní průmysl se možným ziskem elektrické energie z tlumičů zabývá již od počátku 21. století. Existuje mnoho konceptů, některé modifikují dnes běžně používané tlumiče, jiné se vydaly svou cestou. Ačkoli jde někdy o velmi zajímavá řešení, tak žádný z nich nenašel své uplatnění v sériové výrobě, ať už z důvodu vysoké ceny, malé efektivity, či vysoké hmotnosti. Z existujících konceptů bych vyzdvihl tlumič firmy Bose, jehož fungování je zajištěno elektromagnetickým motorem a testováním byla ověřena jeho schopnost téměř dokonalého tlumení nerovností.

Množství získané energie se odvíjí především od nerovností vozovky, po které se vozidlo pohybuje. Podle normy ISO 8608 se silnice rozdělují na 8 typů A-H od nejlepší po nejhorší. Další důležitou roli zde hraje hmotnost odpružené a neodpružené hmoty automobilu, tuhosti pružin, pneumatik a tlumičů. Tyto parametry byly využity pro výpočet stlačení tlumiče a síly na tlumiči za pomoci čtvrtinového modelu automobilu.

Mnou navržený koncepční návrh je vytvořen na základě dnes nepoužívanějších hydraulických tlumičů. Energii získává ze změn tlaku a objemu v pracovní komoře tlumiče, která je pístem rozdělena na dvě části. Převod energie tlumiče na energii elektrickou je zajištěn systémem složeným ze zpětných klapek, turbíny a elektromotoru fungujícím jako generátor. Ze zjištěné síly a pohybu tlumiče jsem vypočítal možný zisk energie za jednu hodinu jízdy pro konkrétní koncepční návrh.

Zisk energie vzhledem k modernímu elektromobilu Tesla model S je pro vozovky typu A a C velmi malý a teoretické zvýšení dojezdu je o pouhé 4m a 40m. U vozovky typu F je zvýšení dojezdu znatelnějších, a to o 2,1km. Z vypočítaných hodnot je zřejmé, že využití tlumiče na výrobu elektrické energie se pro sériově vyráběné automobily nevyplatí. Uplatnění by regenerativní tlumiče tohoto typu mohli najít u vozidel pohybujících se převážně po nepevněných cestách.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SMOON, Suchit, 2014. *Active Air Suspension System: Mechanical project report*. Engineering. CC Attribution License.
- [2] Air Suspension Systems, Wabco [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://inform.wabco-auto.com/intl/pdf/815/00/57/8150100573-15.pdf>
- [3] FANG, Zhigang, Xuexun GUO, Lin XU a Han ZHANG, 2013. An Optimal Algorithm for Energy Recovery of Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber. *Applied Mathematics & Information Sciences* [online]. 7(6), 2207-2214 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.12785/amis/070610. ISSN 1935-0090. Dostupné z: <http://www.naturalspublishing.com/Article.asp?ArtcID=4089>
- [4] WANG, Lirong a Lei ZUO, A Novel Energy Regenerative Shock Absorber. *Create the future* [online]. 17.6.2015 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://contest.techbriefs.com/2015/entries/automotive-transportation/5595#startOfPage>
- [5] A quarter car model of a vehicle suspension is shown in Figure 1., In: Chegg [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/quarter-car-model-vehicle-suspension-shown-figure-1-model-consists-mass-m1-corresponding-q-q24643117>
- [6] SPRINGER, India, 2013. Audi A6 Special Edition — Technology Enhanced. *Auto Tech Review* [online]. 2(6), 54-55 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1365/s40112-013-0343-6. ISSN 2250-3390. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1365/s40112-013-0343-6>
- [7] BROKEŠ, Mirek, Budou tlumiče pérování nabíjet akumulátory automobilů?. *Autoforum* [online]. 3.9.2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/budou-tlumice-perovani-nabijet-akumulatory-automobilu/clanek.php?id=>
- [8] UTTAMRAO PATIL, Rahul a S.S. GAWADE, 2012. *DESIGN AND STATIC MAGNETIC ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC REGENERATIVE SHOCK ABSORBER*. International Journal of Advanced Engineering Technology. ISSN 0976-3945.
- [9] CORSINI, Severino, 2018. *Design of an electromechanical rotative damper prototype for automotive applications*. Turin. Master's degree thesis. POLITECNICO DI TORINO. Vedoucí práce Prof. Andrea Tonoli.
- [10] GUPTA, Abhijit, J. A. JENDRZEJCZYK, T. M. MULCAHY a J. R. HULL, 2006. Design of electromagnetic shock absorbers. *International Journal of Mechanics and Materials in Design* [online]. 3(3), 285-291 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1007/s10999-007-9031-5. ISSN 1569-1713. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10999-007-9031-5>
- [11] Druhy odpružení, ELUC [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1485>

- [12] VLK, František, 2000. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory : hnací charakteristika : brzdění : odpruženost : řiditelnost, ovladatelnost : stabilita*. Brno: VLK. ISBN 80-238-5273-6.
- [13] Electric Truck Exclusively Options Regenerative Magnetic Shock Absorber Technology from Tufts, *Green car congress* [online]. 23.11.2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2008/11/electric-truck.html>
- [14] BAXTER, Eric, How Air Suspension Systems Work. *Howstuffworks* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/air-suspension-systems2.htm>
- [15] BEDNÁŘ, Marek, Jak funguje vzduchové odpružení? A proč jej v osobních autech nevidáme častěji?. *Autoforum* [online]. 25.6.2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/jak-funguje-vzduchove-odpruzeni-a-proc-jej-v-osobnich-autech-nevidame-castěji/>
- [16] K čemu slouží a jak fungují pružiny pérování?, *PIETRO Autodily* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.pietro-eshop.cz/clanky-navody/_zobraz=k-cemu-slouzi-a-jak-funguji-pruziny-perovani-
- [17] KONI Heavy Track Raid lumič Hilux 05+přední, In: *Offroad centrum Plzeň* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://shop.offroad-plzen.cz/detail-zbozi/75-koni-heavy-track-raid-lumic-hilux-05predni/>
- [18] Listová pružnice, In: *Vagony* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://www.vagony.cz/pojezdy/vypruzeni/listova_pruznice.html
- [19] ISO 8608:2016, *Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data*, 2016. Druhé. Švýcarsko
- [20] BEDNÁŘ, Marek, Nejlepší známé odpružení kol aut je staré 13 let. Proč se dodnes nevyrábí?. *Autoforum* [online]. 22.7.2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/nejlepsi-zname-odpruzeni-kol-aut-je-stare-13-let-proc-se-dodnes-nevyrabi/>
- [21] Nový systém tlumičů Audi snižuje spotřebu paliva a zvyšuje komfort, *Hybrid* [online]. 11.8.2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novy-system-tlomicu-audi-snizuje-spotrebu-paliva-zvysuje-komfort>
- [22] Odpružení, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Odpru%C5%BEen%C3%AD#Listov%C3%A9_pru%C5%BEny
- [23] WANG, Jiangbo a Baomin QIANG, *Road simulation for four-wheel vehicle whole input power spectral density* [online]. In: . 2017, s. 020147- [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1063/1.4982512. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4982512>
- [24] Rozšíření řady přívěsů VZ-26 a VZ-27 odpružené listovými pery, In: *Agados trailers* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.agados.cz/novinka-rozsireni-rady-privesu-vz-26-a-vz-27-odpruzene>

- [25] SureRide Air Springs Bag, In: *Ebay* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.ebay.com/itm/SureRide-Air-Springs-Bag-W013589370-W01-358-9370-Best-Warranty-/153013496726?_ul=AR
- [26] Tesla_Model_S, 2001-. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- [27] HARRIS, William, The Bose Suspension System. *Howstuffworks* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://auto.howstuffworks.com/car-suspension9.htm>
- [28] Tlumiče pérování, *ELUC* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1486>
- [29] WABCO OES Air Suspension Compressor, In: *Truckspring* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.truckspring.com/products/WABCO-OES-Air-Suspension-Compressor-Mercedes-Benz-S-Class-E-Class-CLS-Class-Maybach-57-And-62__P-2192.aspx

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Ω	[rad·m ⁻¹]	Úhlová frekvence
Δp	[Pa]	Změna tlaku
c	[N·m ⁻¹ ·s ⁻¹]	Koeficient tlumení tlumič
F	[N]	Síla
$G_d(n)$	[10 ⁻⁶ m ³]	Spektrální hustota nerovností pro prostorovou frekvenci
h	[m]	Výška nerovností
k	[N·m ⁻¹]	Tuhost pružiny
m	[kg]	Hmotnost
n_0	[m ⁻¹]	Prostorová frekvence
P	[W]	Výkon
Q	[m ³ ·s ⁻¹]	Objemový průtok
S	[m ²]	Obsah
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost vozidla
$w(t)$	[-]	Bílý šum
η	[-]	Účinnost